(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 116224825 A
(43)申请公布日 2023.06.06

(21)申请号 202211573441.1

(22)申请日 2022.12.08

(71)申请人 中国科学院力学研究所
地址 100089 北京市海淀区北四环西路15号

(72)发明人 陈明伟 章楚 贺建武 杨超 段俐 康琦

(74)专利代理机构 北京维正专利代理有限公司 11508
专利代理师 周晶晶

(51)Int.Cl.
G05B 17/02(2006.01)

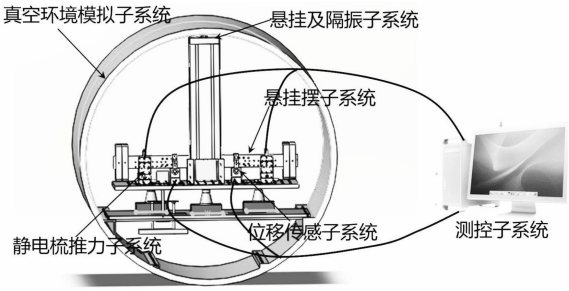
权利要求书3页 说明书7页 附图6页

(54)发明名称

一种基于悬挂摆的单自由度无拖曳控制仿真系统

(57)摘要

本发明公开了一种基于悬挂摆的无拖曳半物理仿真系统，包括环形筒状真空环境模拟子系统、隔振台、悬挂摆子系统、悬挂及隔振子系统、静电梳推力子系统、测控子系统；该悬挂及隔振子系统通过钨丝两端配对安装的钨丝绕线环和夹具锁头将钨丝和悬挂摆子系统的摆杆紧固连接，从而提高无拖曳半物理仿真系统的灵敏度和精度；所述测控子系统用于监测悬挂摆子系统状态变化并输入该控制器中，控制器用于计算并输出静电梳推力子系统所需的静电力信号；本发明按照动力学及主要物理量等效原则设计一种单自由度无拖曳控制半物理仿真方法。该方法模拟各项载荷在无拖曳控制回路中的性能并且验证在地面上控制回路可以达到的无拖曳控制性能指标。



CN 116224825 A

1.一种基于悬挂摆的无拖曳半物理仿真系统，包括布设于地面上的环形筒状真空环境模拟子系统、水平布设在所述环形筒状真空环境模拟子系统内弦上的隔振台、水平布设在该隔振台上方的悬挂摆子系统、竖直布设于真空环境模拟子系统和悬挂摆子系统之间的悬挂及隔振子系统、对称布设于悬挂摆子系统两侧的位移传感子系统和静电梳推力子系统、布设于所述环形筒状真空环境模拟子系统外面的测控子系统；

该悬挂摆子系统用于模拟卫星本体、为无拖曳半物理仿真系统的被控对象；该环形筒状真空环境模拟子系统用于为上述其他子系统提供真空环境、以及用于将地面环境的噪声扰动传递给该仿真系统的被控对象；该悬挂及隔振子系统用于产生对悬挂摆子系统的拉力以及用于减弱地面环境传递的噪声扰动，该拉力抵消了悬挂摆子系统受到的重力；该位移传感子系统用于测量悬挂摆子系统的位移；该静电梳推力子系统用于模拟卫星上的推力器、通过其给悬挂摆子系统输出静电力，使得悬挂摆子系统的角位移和角加速度达到甚至低于指标要求，趋近于静止状态；

其特征在于：该悬挂及隔振子系统设有垂直布设的钨丝(5)，该悬挂摆子系统设有和该钨丝(5)配套的摆杆(1)和配重块(2)；钨丝(5)两端均设有配对安装的钨丝绕线环(8)和夹具锁头(7)，通过钨丝(5)两端配对安装的钨丝绕线环(8)和夹具锁头(7)将钨丝(5)和摆杆(1)紧固连接，从而提高无拖曳半物理仿真系统的灵敏度和精度；所述测控子系统包括位移传感器的测量模块以及控制器(10)，该测量模块用于监测悬挂摆子系统状态变化并输入该控制器(10)中，控制器(10)用于计算并输出静电梳推力子系统所需的静电力信号；所述钨丝(5)的上端通过配对安装的丝绕线环(8)和夹具锁头(7)紧固连接旋转位移调节台(4)、并通过所述旋转位移调节台(4)与环形筒状真空环境模拟子系统固接；钨丝(5)的下端通过配对安装的钨丝绕线环(8)和夹具锁头(7)紧固连接摆杆(1)。

2.根据权利要求1所述一种基于悬挂摆的无拖曳半物理仿真系统，其特征在于：该悬挂摆子系统的配重块(2)用于平衡摆杆(1)，摆杆(1)与配重块(2)被悬挂于隔振台上，二者与隔振台之间均不不接触；该配重块(2)中心孔穿过摆杆(1)，在摆杆(1)两端对称的位置通过螺丝固定；摆杆(1)长度方向中心的上表面设有与夹具锁头(7)相匹配的螺纹孔；摆杆(1)长度方向中心的下表面设有矩形的凹槽，该凹槽内的2个螺纹孔和钨丝绕线环(8)两端贯穿的2个螺纹孔直径相同；摆杆(1)长度方向的两侧设有多个螺纹孔，该螺纹孔用于安装摆杆(1)两侧的静电梳推力子系统的静电梳(6)；所述摆杆(1)与配重(2)的材料包括但不限于殷钢。

3.根据权利要求1所述一种基于悬挂摆的无拖曳半物理仿真系统，其特征在于：所述悬挂及隔振子系统的钨丝绕线环(8)为中间细两端粗的形状，中间细的地方为横放且悬空的圆柱体(8-1)，圆柱体(8-1)中心设有上下贯通的圆孔(8-1-1)；两端粗的地方各为一个螺钉紧固台(8-2)，该螺钉紧固台(8-2)上各设有1个上下贯通的内螺纹孔(8-2-1)；钨丝(5)的下端从圆柱体中心的圆孔(8-1-1)引出以后在圆柱面上缠绕几圈后再缠绕于螺钉的顶部，螺钉穿过所述螺钉紧固台(8-2)的内螺纹孔(8-2-1)，与摆杆(1)中心下表面凹槽内的螺纹孔相匹配；螺钉在拧紧时压紧钨丝(5)，使得钨丝(5)的下端沿着垂直方向固定在钨丝(5)下端的摆杆(1)上；所述钨丝(5)可承载重量不小于12Kg的一个完整的无拖曳仿真系统。

4.根据权利要求1所述一种基于悬挂摆的无拖曳半物理仿真系统，其特征在于：钨丝(5)两端均连接夹具锁头(7)与钨丝绕线环(8)，夹具锁头(7)与钨丝绕线环(8)在钨丝(5)的两端配对布设，钨丝绕线环(8)靠外侧，夹具锁头(7)靠内侧，钨丝绕线环(8)会嵌入并固定

在摆杆(1)和旋转位移调节台(4)中心的凹槽中，夹具锁头(7)的下部设有与摆杆(1)和旋转位移调节台(4)中心的螺纹孔相匹配的外螺纹。

5.根据权利要求1所述一种基于悬挂摆的无拖曳半物理仿真系统，其特征在于：所述夹具锁头(7)包括螺帽(7-1)和内芯(7-2)两部分，所述螺帽(7-1)上部为圆台壳、螺帽(7-1)的下部设有内螺纹；内芯(7-2)部分的中心处为上下贯通的通道，该通道分为五个部分，从下往上依次为圆台形、圆柱形、锥形、竖条细孔、从竖条细孔顶端至夹具锁头(7)的上表面为贯穿的“一字型”缝隙；该内芯(7-2)部分上部为圆台和圆柱的组合，该圆台的中心处对应通道的“一字型”缝隙；该圆柱的中心处对应所述竖条细孔；该内芯(7-2)部分的中部和底部的圆柱体直径加大并设有外螺纹，该外螺纹和所述螺帽(7-1)下部的内螺纹相匹配；内芯(7-2)底部的外螺纹用于和摆杆(1)中心上表面内螺纹孔相匹配；钨丝(5)的上端由下至上从钨丝绕线环(8)中心处引出，再由下至上从夹具锁头(7)贯穿通道的五个部分穿出，当螺帽(7-1)向下旋紧时，螺帽(7-1)的圆台壳压迫到内芯(7-2)上部的圆台上，从而将内芯(7-2)上部圆台的“一字型”缝隙压紧，从而将钨丝夹紧。

6.根据权利要求1所述一种基于悬挂摆的无拖曳半物理仿真系统，其特征在于：所述对称布设于悬挂摆子系统两侧的位移传感子系统和摆杆(1)非接触布设，位移传感子系统和摆杆(1)的距离小于位移传感子系统的量程范围；所述位移传感子系统的量程为0-500μm，位移测量的静态分辨率0.375nm，动态分辨率10nm；所述位移传感子系统包括电容传感器(9)、传感器夹具、限位机构、控制器和同轴真空馈通电极；两套电容位移传感器沿着摆杆(1)轴向中心点对称分布，能够测量悬挂摆的共模和差模位移，也就是晃动和转动。

7.根据权利要求1所述一种基于悬挂摆的无拖曳半物理仿真系统，其特征在于：所述该静电梳推力子系统用于向悬挂摆子系统输出静电力直至悬挂摆子系统趋近于静止的状态，该状态既是悬挂摆子系统的角位移变化低于10^{-6}rad、角加速度低于10^{-8}rad/s^2；该静电梳推力子系统包含静电梳、高精度源表，高压电源和信号转换控制器，该静电梳产生的作用力范围为0～1000μN，随电压信号变化而改变。

8.根据权利要求1所述一种基于悬挂摆的无拖曳半物理仿真系统，其特征在于：该测控子系统包括NI多功能数据采集卡、PC机和无拖曳控制程序，实现无拖曳仿真系统的测量与控制功能，并提供实时数据处理、显示和存储功能。

9.根据权利要求8所述一种基于悬挂摆的无拖曳半物理仿真系统，其特征在于：该无拖曳控制程序为一个闭环控制过程，该无拖曳控制程序计算悬挂摆子系统达到设定角度以及抵消输入扰动力所需的静电力，并将该静电力控制摆杆的运动，直至摆杆位移变化趋近于零。

10.根据权利要求9所述一种基于悬挂摆的无拖曳半物理仿真系统，其特征在于：所述无拖曳控制程序包括输入角度设定值模块、位移转换计算模块、控制器模块、输入扰动力设定值模块、静电力计算模块1、静电力计算模块2、、静电梳子系统、摆杆、位移传感器子系统；程序中位移信号由位移传感器子系统给出；程序中角度差是输入角度设定值模块的角度设定值与位移转换计算模块给出的角位移信号之间的差值；所述控制器模块将该角度差转换为控制力矩并将该力矩输出给所述静电力计算子模块1，静电力计算子模块1将该控制力矩转换为电压信号1；所述电压信号2是将输入扰动力设定值输入静电力计算子模块2、并计算出的信号；所述静电梳子系统将输入的电压信号1、电压信号2转换为静电力，并用该静电力

控制摆杆的位移;再通过所述无拖曳控制程序的位移传感器子系统测量,将该位移信号再次发送给位移转换计算子模块,位移转换计算子模块重新反馈角度位移信号并与角度设定值进行比较,等于0则停止,然而摆杆无法处于绝对静止的状态,所以会继续将角度差转换为控制力矩一直循环下去,达到一种趋近于零的状态。

一种基于悬挂摆的单自由度无拖曳控制仿真系统

技术领域

[0001] 本发明属航天控制技术领域，尤其涉及一种基于悬挂摆的单自由度无拖曳控制仿真系统。

背景技术

[0002] 无拖曳卫星及其控制技术在很多空间科学及工程任务中具有重要的应用，特别是在近年来，随着我国空间科学的发展，科学家们提出了我国的空间引力波探测和重力场测量计划。无拖曳卫星在这些任务中占有重要地位，无拖曳控制研究对推动我国空间科学的发展具有重要的意义。

[0003] 卫星无拖曳控制敏感轴方向的残余加速度控制要求极高，由于地面重力环境的约束，难以直接在地面以整星的方式进行模拟实验。因此，有必要在地面搭建无拖曳半物理仿真系统，模拟各项载荷在无拖曳控制回路中的性能，以及验证在地面上可以达到的无拖曳控制性能指标。

[0004] 在地面搭建无拖曳半物理仿真系统的难点之一在于：受地面环境影响，仿真系统模拟太空中微重力环境时，需克服地球引力及降低地面环境噪声的影响；

[0005] 在地面搭建无拖曳半物理仿真系统的难点之二在于：仿真系统其模拟控制的对象是“地面上看似静止的物体”——悬挂摆杆，考虑的主要是地面上中低频段噪声产生的微小干扰。因此仿真系统的实验非常精细，难以监测并稳定控制“地面上看似静止的物体”的状态变化。

发明内容

[0006] 本发明为解决现有技术存在的问题，提出一种基于悬挂摆的单自由度无拖曳控制仿真系统，目的在于克服地面重力环境的影响，模拟无拖曳卫星建立高精度高灵敏度的地面仿真控制回路，尽可能的模拟真实太空环境下仿真系统的无拖曳控制实验。

[0007] 本发明为解决其技术问题采用以下技术方案

[0008] 一种基于悬挂摆的无拖曳半物理仿真系统，包括布设于地面上的环形筒状真空环境模拟子系统、水平布设在所述环形筒状真空环境模拟子系统内弦上的隔振台、水平布设在该隔振台上方的悬挂摆子系统、竖直布设于真空环境模拟子系统和悬挂摆子系统之间的悬挂及隔振子系统、对称布设于悬挂摆子系统两侧的位移传感子系统和静电梳推力子系统、布设于所述环形筒状真空环境模拟子系统外面的测控子系统；

[0009] 该悬挂摆子系统用于模拟卫星本体、为无拖曳半物理仿真系统的被控对象；该环形筒状真空环境模拟子系统用于为上述其他子系统提供真空环境、以及用于将地面环境的噪声扰动传递给该仿真系统的被控对象；该悬挂及隔振子系统用于产生对悬挂摆子系统的拉力以及用于减弱地面环境传递的噪声扰动，该拉力抵消了悬挂摆子系统受到的重力；该位移传感子系统用于测量悬挂摆子系统的位移；该静电梳推力子系统用于模拟卫星上的推力器、通过其给悬挂摆子系统输出静电力，使得悬挂摆子系统的角位移和角加速度达到甚

至低于指标要求，趋近于静止状态；

[0010] 其特点是：该悬挂及隔振子系统设有垂直布设的钨丝5，该悬挂摆子系统设有和该钨丝5配套的摆杆1和配重块2；钨丝5两端均设有配对安装的钨丝绕线环8和夹具锁头7，通过钨丝5两端配对安装的钨丝绕线环8和夹具锁头7将钨丝5和摆杆1紧固连接，从而提高无拖曳半物理仿真系统的灵敏度和精度；所述测控子系统包括位移传感器的测量模块以及控制器10，该测量模块用于监测悬挂摆子系统状态变化并输入该控制器10中，控制器10用于计算并输出静电梳推力子系统所需的静电力信号；所述钨丝5的上端通过配对安装的丝绕线环8和夹具锁头7紧固连接旋转位移调节台4、并通过所述旋转位移调节台4与环形筒状真空环境模拟子系统固接；钨丝5的下端通过配对安装的钨丝绕线环8和夹具锁头7紧固连接摆杆1。

[0011] 进一步地，该悬挂摆子系统的配重块2用于平衡摆杆1，摆杆1与配重块2被悬挂于隔振台上，二者与隔振台之间均不不接触；该配重块2中心孔穿过摆杆1，在摆杆1两端对称的位置通过螺丝固定；摆杆1长度方向中心的上表面设有与夹具锁头7相匹配的螺纹孔；摆杆1长度方向中心的下表面设有矩形的凹槽，该凹槽内的2个螺纹孔和钨丝绕线环8两端贯穿的2个螺纹孔直径相同；摆杆1长度方向的两侧设有多个螺纹孔，该螺纹孔用于安装摆杆1两侧的静电梳推力子系统的静电梳6；所述摆杆1与配重2的材料包括但不限于殷钢。

[0012] 进一步地，所述悬挂及隔振子系统的钨丝绕线环8为中间细两端粗的形状，中间细的地方为横放且悬空的圆柱体8-1，圆柱体8-1中心设有上下贯通的圆孔8-1-1；两端粗的地方各为一个螺钉紧固台8-2，该螺钉紧固台8-2上各设有1个上下贯通的内螺纹孔8-2-1；钨丝5的下端从圆柱体中心的圆孔8-1-1引出以后在圆柱面上缠绕几圈后再缠绕于螺钉的顶部，螺钉穿过所述螺钉紧固台8-2的内螺纹孔8-2-1，与摆杆1中心下表面凹槽内的螺纹孔相匹配；螺钉在拧紧时压紧钨丝5，使得钨丝5的下端沿着垂直方向固定在钨丝5下端的摆杆1上；所述钨丝5可承载重量不小于12Kg的一个完整的无拖曳仿真系统；

[0013] 进一步地，钨丝5两端均连接夹具锁头7与钨丝绕线环8，夹具锁头7与钨丝绕线环8在钨丝5的两端配对布设，钨丝绕线环8靠外侧，夹具锁头7靠内侧，钨丝绕线环8会嵌入并固定在摆杆1和旋转位移调节台4中心的凹槽中，夹具锁头7的下部设有与摆杆1和旋转位移调节台4中心的螺纹孔相匹配的外螺纹。

[0014] 进一步地，所述夹具锁头7包括螺帽7-1和内芯7-2两部分，所述夹具锁头7包括螺帽7-1和内芯7-2两部分，所述螺帽7-1上部为圆台壳、螺帽7-1的下部设有内螺纹；内芯7-2部分的中心处为上下贯通的通道，该通道分为五个部分，从下往上依次为圆台形、圆柱形、锥形、竖条细孔、从竖条细孔顶端至夹具锁头7的上表面为贯穿的“一字型”缝隙；该内芯7-2部分上部为圆台和圆柱的组合，该圆台的中心处对应通道的“一字型”缝隙；该圆柱的中心处对应所述竖条细孔；该内芯7-2部分的中部和底部的圆柱体直径加大并设有外螺纹，该外螺纹和所述螺帽7-1下部的内螺纹相匹配；内芯7-2底部的外螺纹用于和摆杆1中心上表面内螺纹孔相匹配；钨丝5的上端由下至上从钨丝绕线环8中心处引出，再由下至上从夹具锁头7贯穿通道的五个部分穿出，当螺帽7-1向下旋紧时，螺帽7-1的圆台壳压迫到内芯7-2上部的圆台上，从而将内芯7-2上部圆台的“一字型”缝隙压紧，从而将钨丝夹紧。

[0015] 进一步地，所述对称布设于悬挂摆子系统两侧的位移传感子系统和摆杆1非接触布设，位移传感子系统和摆杆1的距离小于位移传感子系统的量程范围；所述位移传感子系

统的量程为0-500μm,位移测量的静态分辨率0.375nm,动态分辨率10nm;所述位移传感子系统包括电容传感器9、传感器夹具、限位机构、控制器和同轴真空馈通电极;两套电容传感器沿着摆杆1轴向中心点对称分布,能够测量悬挂摆的共模和差模位移,也就是晃动和转动

[0016] 进一步地,所述该静电梳推力子系统用于向悬挂摆子系统输出静电力直至悬挂摆子系统趋近于静止的状态,该状态既是悬挂摆子系统的角位移变化低于10^{-6}rad、角加速度低于10^{-8}rad/s^2;该静电梳推力子系统包含静电梳、高精度源表,高压电源和信号转换控制器,该静电梳产生的作用力范围为0～1000μN,随电压信号变化而改变。

[0017] 进一步地,该测控子系统包括NI多功能数据采集卡、PC机和无拖曳控制程序,实现无拖曳仿真系统的测量与控制功能,并提供实时数据处理、显示和存储功能。

[0018] 进一步地,该无拖曳控制程序为一个闭环控制过程,该模块计算悬挂摆子系统达到设定角度以及抵消输入扰动力所需的静电力,并将该静电力控制摆杆的运动,直至摆杆位移变化趋近于零。

[0019] 进一步地,所述无拖曳控制程序包括输入角度设定值模块、位移转换计算模块、控制器模块、输入扰动力设定值模块、静电力计算模块1、静电力计算模块2、、静电梳子系统、摆杆、位移传感器子系统;程序中位移信号由位移传感器子系统给出;程序中角度差是输入角度设定值模块的角度设定值与位移转换计算模块给出的角位移信号之间的差值;所述控制器子模块将该角度差转换为控制力矩并将该力矩输出给所述静电力计算子模块1,静电力计算子模块1将该控制力矩转换为电压信号1;所述电压信号2是将输入扰动力设定值输入静电力计算子模块2并计算出的信号;所述静电梳子系统将输入的电压信号1、电压信号2转换为静电力,并用该静电力控制摆杆的位移。再通过所述无拖曳控制程序的位移传感器子系统测量,将该位移信号再次发送给位移转换计算子模块,位移转换计算子模块重新反馈角度位移信号并于角度设定值进行比较,等于0则停止,然而摆杆无法处于绝对静止的状态,所以会继续将角度差转换为控制力矩一直循环下去,达到一种趋近于零的状态。

[0020] 本发明的优点效果

[0021] 1、本发明在卫星无拖曳工作原理的基础上,按照动力学及主要物理量等效原则设计一种单自由度无拖曳控制半物理仿真方法。该方法模拟各项载荷在无拖曳控制回路中的性能并且验证在地面上控制回路可以达到的无拖曳控制性能指标。

[0022] 2、本发明采用将真空环境模拟子系统、隔振台、悬挂摆子系统、悬挂及隔振子系统、位移传感子系统、静电梳推力子系统、测控子系统相结合的方法,降低了地面环境对系统的影响,满足了仿真系统实验高精度高灵敏度的要求,并能解决对“地面上看似静止的物体”的状态监测及稳定控制的难题:通过钨丝悬挂的方式以及在真空罐中搭建各子系统,钨丝的拉力抵消了摆的重力,并且系统模拟了卫星的太空环境,从而解决了仿真系统受地面环境影响难以模拟太空中微重力环境的难题;通过在钨丝的两端配对安装钨丝绕线环和钨丝夹具锁头,使得钨丝与摆杆和旋转位移调节台的结合可靠有效,提高了仿真系统的精度和灵敏度。

附图说明

[0023] 图1为本发明基于悬挂摆的无拖曳仿真系统组成示意图;

[0024] 图2为本发明推力测量系统扭摆构型设计;

[0025] 图3a为本发明悬挂摆子系统的摆杆示意图；

[0026] 图3b为本发明悬挂摆子系统的配重块示意图；

[0027] 图4为本发明悬挂及隔振子系统示意图；

[0028] 图4a为本发明悬挂及隔振子系统钨丝绕线环示意图；

[0029] 图4b为本发明悬挂及隔振子系统钨丝夹具锁头立体图；

[0030] 图4c为本发明悬挂及隔振子系统钨丝夹具锁头剖面图；

[0031] 图5为本发明扭摆测量与控制示意图；

[0032] 图6为本发明无拖曳控制程序闭环控制过程示意图；

[0033] 图中，1：摆杆；2：配重块；3：隔振台；4：旋转位移调节台；5：钨丝；6：静电梳；7：夹具锁头；7-1：螺帽；7-2：内芯；8：钨丝绕线环；8-1：圆柱体；8-1-1：圆孔；8-2：螺钉紧固台；8-2-1：内螺纹孔；9：电容传感器；10：测控子系统。

具体实施方式

[0034] 本发明设计原理

[0035] 1、悬挂及隔振子系统的设计原理：1)该子系统用钨丝悬挂摆杆是为了利用钨丝拉力抵消摆杆所受重力，模拟了卫星在太空中的微重力环境。2)该子系统还设有旋转位移调节台以及隔振台，进一步减小了地面环境的噪声，也就是微弱干扰力，更好的模拟了卫星的微重力环境。

[0036] 2、静电梳推力子系统的设计原理：本发明静电梳就是模拟无拖曳卫星的微推力器。无拖曳卫星在太空中运行会受到各种干扰力，使得卫星的微重力水平不满足要求，也就是其加速度无法达到指标要求，例如$10^{-8}m/s^2$，而微推力器产生的推力会抵消这些干扰力带来的影响，主动控制卫星的运动，也就是满足卫星的加速度指标要求值。卫星上的微推力器施加在卫星本体上的作用力是微牛级的，具有噪声低、分辨率高和响应时间快的特点。静电梳产生的静电力也具有相同的特点，故在仿真系统采用静电梳中产生作用力施加在悬挂摆上。同时也避免了采用真实推力器的复杂气路和电路连接问题。静电梳产生的静电力会抵消摆杆所受的各种干扰力，控制悬挂摆杆的转动，使得摆杆的角加速度值满足要求。

[0037] 3、摆杆的下端设有和钨丝绕线环相匹配的凹槽，钨丝绕线环嵌入该方槽中并用螺丝固定，钨丝的下端通过钨丝绕线环连接摆杆，它们的连接方式并不能使得摆杆与钨丝同步转动，系统的灵敏度较低，控制过程会有延迟。使用钨丝夹具锁头，使得钨丝被钨丝夹具锁头的“一字型”缝隙夹紧，相当于将钨丝与摆杆“焊接”，由此实现了钨丝和摆杆同步摆动，缩短系统的响应时间，提高了系统的控制灵敏度。

[0038] 4、本发明专利是在卫星无拖曳工作原理的基础上，按照动力学及主要物理量等效原则设计提出一种单自由度无拖曳控制半物理仿真方法。该方案模拟各项载荷在无拖曳控制回路中的性能并且验证在地面控制回路中可以达到的无拖曳控制性能指标。主要创新点在于：1)基于动力学等效原则，地面悬挂扭摆的小角度转动等效模拟卫星无拖曳控制敏感轴的平动；2)按照动力学等效原则，采用静电梳控制系统等效替代无拖曳控制系统的微推力器；3)设计对应星上不同工作模式的地面无拖曳工作模式以及对应的无拖曳控制器，验证了无拖曳系统的功能和技术指标。

[0039] 基于以上发明原理，本发明设计了一种基于悬挂摆的无拖曳半物理仿真系

[0040] 一种基于悬挂摆的无拖曳半物理仿真系统如图1所示，包括布设于地面上的环形筒状真空环境模拟子系统、水平布设在所述环形筒状真空环境模拟子系统内弦上的隔振台、水平布设在该隔振台上方的悬挂摆子系统、竖直布设于真空环境模拟子系统和悬挂摆子系统之间的悬挂及隔振子系统、对称布设于悬挂摆子系统两侧的位移传感子系统和静电梳推力子系统、布设于所述环形筒状真空环境模拟子系统外面的测控子系统；

[0041] 该悬挂摆子系统用于模拟卫星本体、为无拖曳半物理仿真系统的被控对象；该环形筒状真空环境模拟子系统用于为上述其他子系统提供真空环境、以及用于将地面环境的噪声扰动传递给该仿真系统的被控对象；该悬挂及隔振子系统用于产生对悬挂摆子系统的拉力以及用于减弱地面环境传递的噪声扰动，该拉力抵消了悬挂摆子系统受到的重力；该位移传感子系统用于测量悬挂摆子系统的位移；该静电梳推力子系统用于模拟卫星上的推力器、通过其给悬挂摆子系统输出静电力，使得悬挂摆子系统的角位移和角加速度达到甚至低于指标要求，趋近于静止状态；

[0042] 补充说明1

[0043] 仿真系统让摆杆产生摆动：通过摆杆和地面的连接方式使得摆杆产生摆动。地面的噪声传给真空环境模拟子系统的真空罐、真空罐再把地面的噪声传给旋转位移调节台、旋转位移调节台再把地面的噪声传给钨丝、钨丝再把地面的噪声传给摆杆，由于摆杆两端的配重块悬空于隔振台，当地面的噪声最终传递给钨丝、钨丝传递给摆杆时，摆杆接收受到地面噪声时就会产生不规则的运动。

[0044] 其特点如图2所示：该悬挂及隔振子系统设有垂直布设的钨丝5，该悬挂摆子系统设有和该钨丝5配套的摆杆1和配重块2；钨丝5两端均设有配对安装的钨丝绕线环8和夹具锁头7，通过钨丝5两端配对安装的钨丝绕线环8和夹具锁头7将钨丝5和摆杆1紧固连接，从而提高无拖曳半物理仿真系统的灵敏度和精度；所述测控子系统包括位移传感器的测量模块以及控制器10，该测量模块用于监测悬挂摆子系统状态变化并输入该控制器10中，控制器10用于计算并输出静电梳推力子系统所需的静电力信号；所述钨丝5的上端通过配对安装的丝绕线环8和夹具锁头7紧固连接旋转位移调节台4、并通过所述旋转位移调节台4与环形筒状真空环境模拟子系统固接；钨丝5的下端通过配对安装的钨丝绕线环8和夹具锁头7紧固连接摆杆1。

[0045] 进一步地，如图3a、3b所示，该悬挂摆子系统的配重块2用于平衡摆杆1，摆杆1与配重块2被悬挂于隔振台上，二者与隔振台之间均不不接触；该配重块2中心孔穿过摆杆1，在摆杆1两端对称的位置通过螺丝固定；摆杆1长度方向中心的上表面设有与夹具锁头7相匹配的螺纹孔；摆杆1长度方向中心的下表面设有矩形的凹槽，该凹槽内的2个螺纹孔和钨丝绕线环8两端贯穿的2个螺纹孔直径相同；摆杆1长度方向的两侧设有多个螺纹孔，该螺纹孔用于安装摆杆1两侧的静电梳推力子系统的静电梳6；所述摆杆1与配重2的材料包括但不限于殷钢。

[0046] 补充说明2

[0047] 该摆杆1两端的配重块2安装完成后再整体悬挂于隔振台3之上，并不与隔振台3接触。为了保证摆杆1两侧对称布设的静电梳6和位移传感器9可以正常工作，需要使用旋转位移调节台4对摆杆1和配重块2的水平和竖直方向的位置进行调节。

[0048] 进一步地，如图4a所示，所述悬挂及隔振子系统的钨丝绕线环8为中间细两端粗的

形状，中间细的地方为横放且悬空的圆柱体8-1，圆柱体8-1中心设有上下贯通的圆孔8-1-1；两端粗的地方各为一个螺钉紧固台8-2，该螺钉紧固台8-2上各设有1个上下贯通的内螺纹孔8-2-1；钨丝5的下端从圆柱体中心的圆孔8-1-1引出以后在圆柱面上缠绕几圈后再缠绕于螺钉的顶部，螺钉穿过所述螺钉紧固台8-2的内螺纹孔8-2-1，与摆杆1中心下表面凹槽内的螺纹孔相匹配；螺钉在拧紧时压紧钨丝5，使得钨丝5的下端沿着垂直方向固定在钨丝5下端的摆杆1上；所述钨丝5可承载重量不小于12Kg的一个完整的无拖曳仿真系统；

[0049] 进一步地，如图4所示，钨丝5两端均连接夹具锁头7与钨丝绕线环8，夹具锁头7与钨丝绕线环8在钨丝5的两端配对布设，钨丝绕线环8靠外侧，夹具锁头7靠内侧，钨丝绕线环8会嵌入并固定在摆杆1和旋转位移调节台4中心的凹槽中，夹具锁头7的下部设有与摆杆1和旋转位移调节台4中心的螺纹孔相匹配的外螺纹。

[0050] 进一步地，如图4b、4c所示，所述夹具锁头7包括螺帽7-1和内芯7-2两部分，所述夹具锁头7包括螺帽7-1和内芯7-2两部分，所述螺帽7-1上部为圆台壳、螺帽7-1的下部设有内螺纹；内芯7-2部分的中心处为上下贯通的通道，该通道分为五个部分，从下往上依次为圆台形、圆柱形、锥形、竖条细孔、从竖条细孔顶端至夹具锁头7的上表面为贯穿的“一字型”缝隙；该内芯7-2部分上部为圆台和圆柱的组合，该圆台的中心处对应通道的“一字型”缝隙；该圆柱的中心处对应所述竖条细孔；该内芯7-2部分的中部和底部的圆柱体直径加大并设有外螺纹，该外螺纹和所述螺帽7-1下部的内螺纹相匹配；内芯7-2底部的外螺纹用于和摆杆1中心上表面内螺纹孔相匹配；钨丝5的上端由下至上从钨丝绕线环8中心处引出，再由下至上从夹具锁头7贯穿通道的五个部分穿出，当螺帽7-1向下旋紧时，螺帽7-1的圆台壳压迫到内芯7-2上部的圆台上，从而将内芯7-2上部圆台的“一字型”缝隙压紧，从而将钨丝夹紧。

[0051] 进一步地，如图5所示，所述对称布设于悬挂摆子系统两侧的位移传感子系统和摆杆1非接触布设，位移传感子系统和摆杆1的距离小于位移传感子系统的量程范围；所述位移传感子系统的量程为0-500μm，位移测量的静态分辨率0.375nm，动态分辨率10nm；所述位移传感子系统包括电容传感器9、传感器夹具、限位机构、控制器和同轴真空馈通电极；两套电容传感器沿着摆杆1轴向中心点对称分布，能够测量悬挂摆的共模和差模位移，也就是晃动和转动

[0052] 补充说明3

[0053] 如图2、图5所示，图5上下左右对称布设的4个黑色矩形框代表位移传感子系统，该位移传感子系统和摆杆非接触布设；且位移传感子系统和摆杆1的距离小于位移传感子系统的量程范围。

[0054] 进一步地，所述该静电梳推力子系统用于向悬挂摆子系统输出静电力直至悬挂摆子系统趋近于静止的状态，该状态既是悬挂摆子系统的角位移变化低于10^{-6}rad、角加速度低于10^{-8}rad/s^2；该静电梳推力子系统包含静电梳、高精度源表，高压电源和信号转换控制器，该静电梳产生的作用力范围为0～1000μN，随电压信号变化而改变。

[0055] 补充说明4

[0056] 如图5所示，图5上下左右对称布设的4个白色矩形框代表静电梳推力子系统，该静电梳推力子系统和摆杆1通过摆杆1上的螺纹孔固接。

[0057] 进一步地，该测控子系统包括NI多功能数据采集卡、PC机和无拖曳控制程序，实现无拖曳仿真系统的测量与控制功能，并提供实时数据处理、显示和存储功能。

[0058] 补充说明5

[0059] 图1中的测控子系统该测控子系统主要包括连接线、电脑和无拖曳控制程序，并且只与位移传感子系统和静电梳推力子系统通过连接线直接连接，位移传感子系统将检测到的位移信号通过连接线输入到测控子系统中，并且测控子系统的输出指令也通过另外的连接线输出到静电推力子系统中。

[0060] 进一步地，该无拖曳控制程序为一个闭环控制过程，该模块计算悬挂摆子系统达到设定角度以及抵消输入扰动力所需的静电力，并将该静电力控制摆杆的运动，直至摆杆位移变化趋近于零。

[0061] 进一步地，如图6所示，所述无拖曳控制程序包括输入角度设定值模块、位移转换计算模块、控制器模块、输入扰动力设定值模块、静电力计算模块1、静电力计算模块2、、静电梳子系统、摆杆、位移传感器子系统；程序中位移信号由位移传感器子系统给出；程序中角度差是输入角度设定值模块的角度设定值与位移转换计算模块给出的角位移信号之间的差值；所述控制器子模块将该角度差转换为控制力矩并将该力矩输出给所述静电力计算子模块1，静电力计算子模块1将该控制力矩转换为电压信号1；所述电压信号2是将输入扰动力设定值输入静电力计算子模块2并计算出的信号；所述静电梳子系统将输入的电压信号1、电压信号2转换为静电力，并用该静电力控制摆杆的位移。再通过所述无拖曳控制程序的位移传感器子系统测量，将该位移信号再次发送给位移转换计算子模块，位移转换计算子模块重新反馈角度位移信号并于角度设定值进行比较，等于0则停止，然而摆杆无法处于绝对静止的状态，所以会继续将角度差转换为控制力矩一直循环下去，达到一种趋近于零的状态。

[0062] 需要强调的是，上述具体实施例仅仅是对本发明的解释，其并不是对本发明的限制，本领域技术人员在阅读完本说明书后可以根据需要对上述实施例做出没有创造性贡献的修改，但只要在本发明的权利要求范围内都受到专利法的保护。

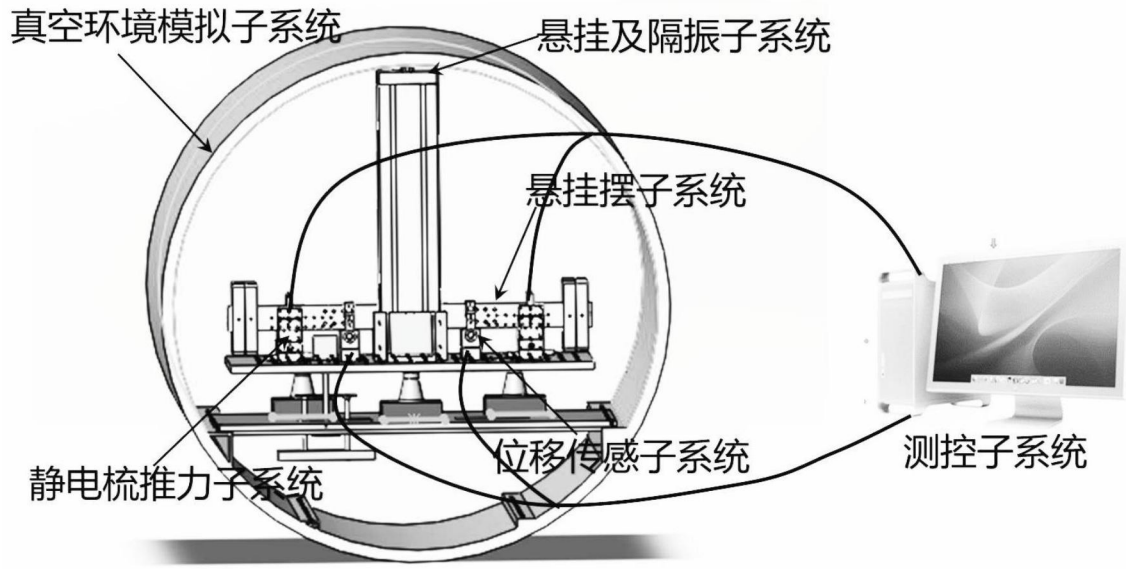

真空环境模拟子系统
悬挂及隔振子系统
悬挂摆子系统
静电梳推力子系统
位移传感子系统
测控子系统

图1

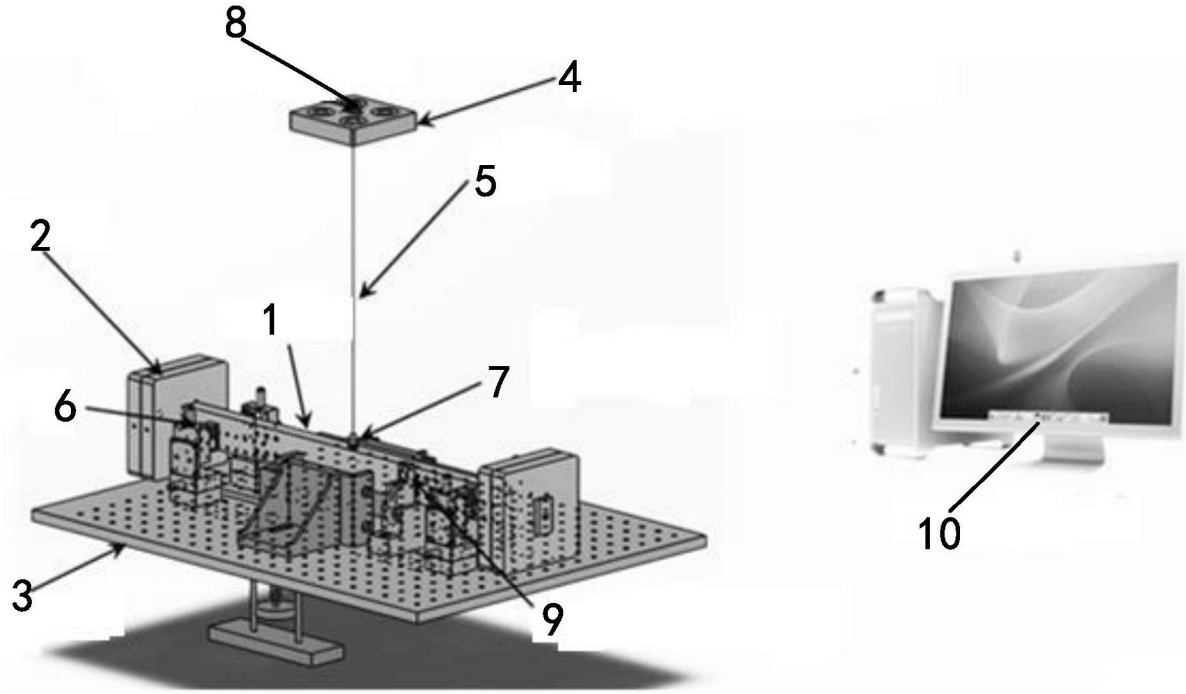

8
4
5
2
1
7
6
3
9
10

图2

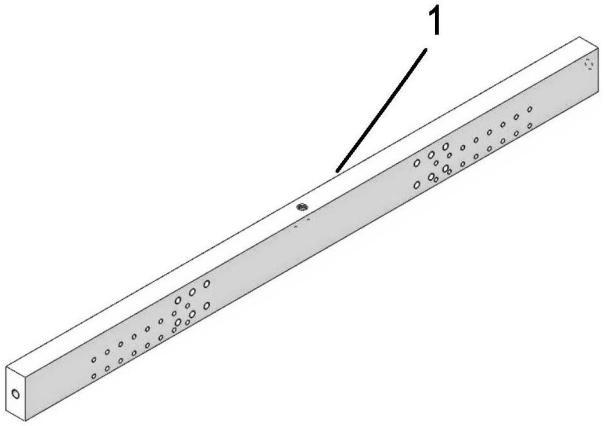


图3a

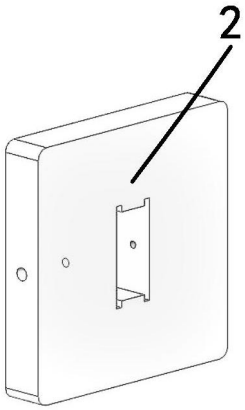


图3b

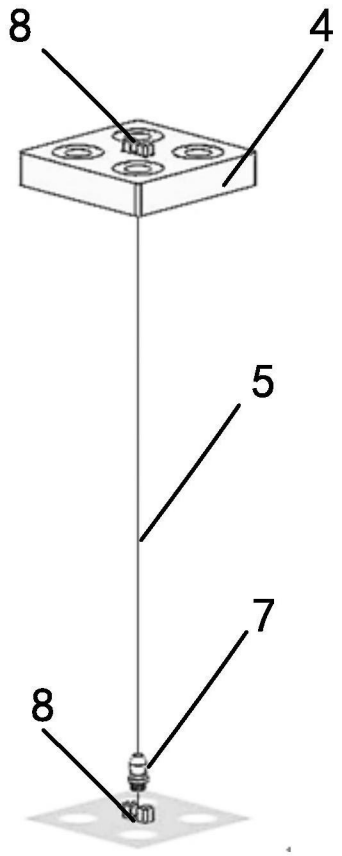


图4

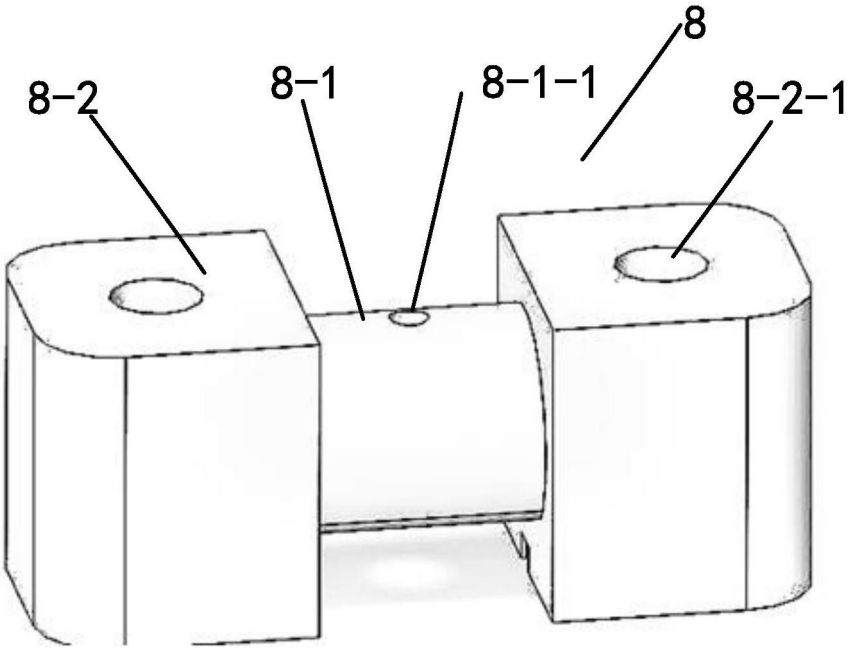


图4a

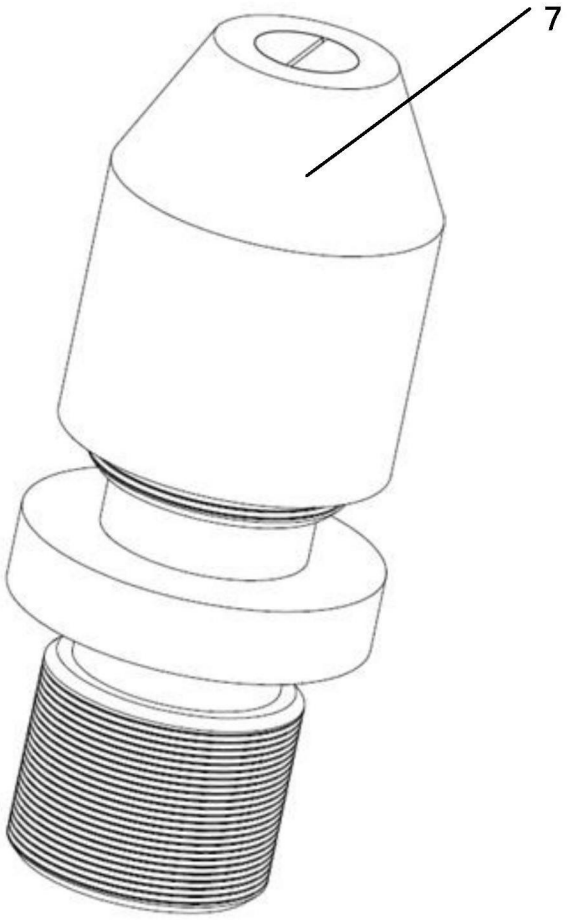


图4b

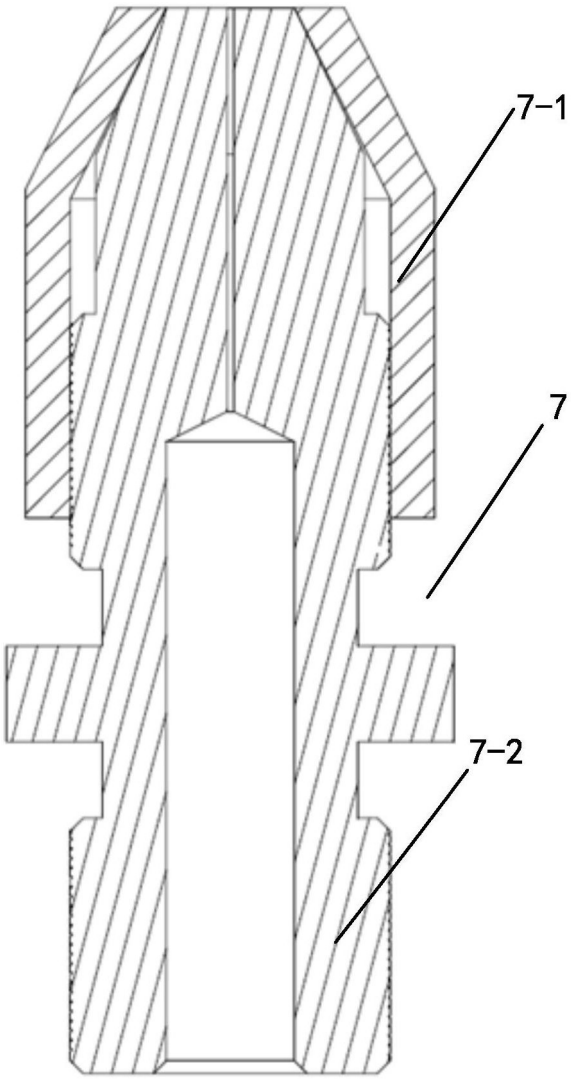


图4c

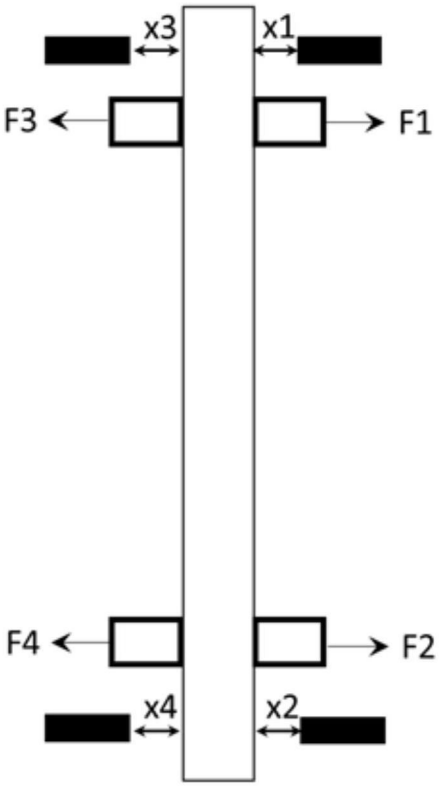

x3
x1
F3
F1
F4
F2
x4
x2

图5

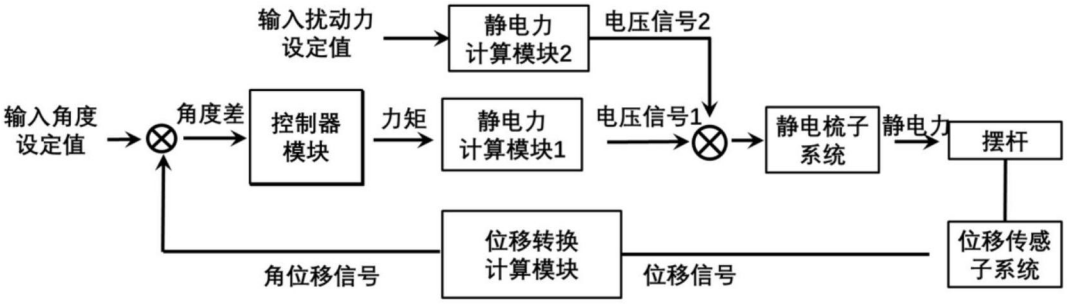

输入扰动力
设定值
静电力
计算模块2
电压信号2
输入角度
设定值
角度差
控制器
模块
力矩
静电力
计算模块1
电压信号1
静电梳子
系统
静电力
摆杆
位移转换
计算模块
位移传感
子系统
角位移信号
位移信号

图6